



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

LCL

Shen, Pan; Han, Yang; Guerrero, Josep M.

Published in:
Dianli Dianzi Jishu

Publication date:
2016

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Shen, P., Han, Y., & Guerrero, J. M. (2016). LCL . *Dianli Dianzi Jishu*, 50(2), 66-68.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

三相 LCL 型并网逆变器控制策略与稳定性分析

沈攀^{1,2}, 韩杨^{1,2}, Josep M. Guerrero³

(1.电子科技大学, 四川 成都 611731;

2.输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

3. 奥尔堡大学, 丹麦 奥尔堡 9220)

摘要:针对三相 LCL 型并网逆变器,研究了基于比例谐振(PR)控制以及电网电压前馈控制的电容电流与电网电流双闭环控制策略,并分别与网侧电流反馈和逆变器侧电流反馈控制策略进行了对比分析。采用 s 域和 z 域根轨迹方法分析 PR 控制器参数的选取以及不同延时对系统稳定性的影响。最后,仿真和实验结果验证了理论分析的正确性和控制策略的可行性。

关键词:逆变器;滤波器;比例谐振

中图分类号: TM464

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2016)02-0066-03

Control Strategies and Stability Analysis of Three-phase LCL-type Grid-connected Inverter

SHEN Pan^{1,2}, HAN Yang^{1,2}, Josep M. Guerrero³

(1. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: A dual current-loop control strategy which combines the capacitor current, grid-side current feedback and grid voltage feed-forward compensation strategy which based on the proportional resonant (PR) control is analyzed for the grid-connected inverter based on LCL-topology. The grid-side current feedback and inverter current feed-back control strategy are compared with the dual current-loop control strategy, separately. The influence of PR controller parameters and the effect of different control delay on system stability is presented. Finally, the proposed control strategy is verified by the experimental results.

Keywords: inverter; filter; proportional resonant control

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51307015); State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(No.2007DA10512713405)

1 引言

LCL滤波器输入电压到输出电流的传递函数为三阶系统,可在高频段实现更大的谐波电流衰减,但要解决谐振问题^[1]。文献[2-4]提出多种解决方法,但均有不足。针对三相 LCL 型并网逆变器拓扑,研究了电容电流和并网电流双闭环控制策略,分析了电网电压畸变和谐波负载等扰动对系统的影响,采用根轨迹方法分析了系统的临界稳定点。通过仿真和实验对所提控制方法进行了验证。

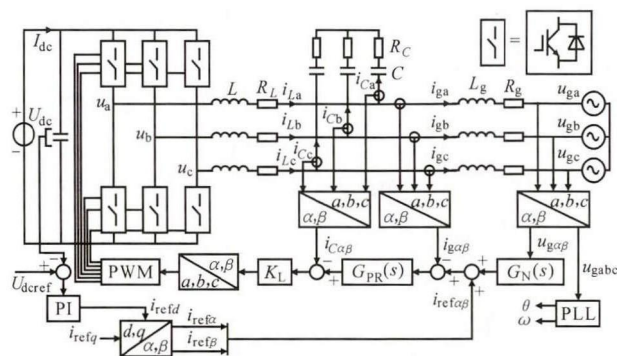
2 LCL型并网逆变器数学模型

三相 LCL 型并网逆变器系统如图 1 所示。

基金项目:国家自然科学基金(51307015);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(2007DA10512713405)

定稿日期: 2015-05-04

作者简介:沈攀(1991-),男,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用及微电网。



L, L_n 和 C 分别为滤波电感、网侧电感和滤波电容; R_L, R_n 分别为滤波电感和网侧电感寄生电阻; R_C 为滤波电容寄生电阻; i_L 为逆变器侧电流; i_C 为滤波电容电流; i_n 为网侧电流; u_C 为电容电压; u_L 为逆变器侧电压; u_n 为电网电压; K_i 为比例增益。

图 1 三相 LCL 型并网逆变器拓扑

Fig. 1 Topology of three-phase grid-connected inverter

2.1 电容电流与电网电流的双闭环控制策略

这里提出以电容电流与电网电流双闭环(i_c+i_g)控制的系统框图如图 2 所示。

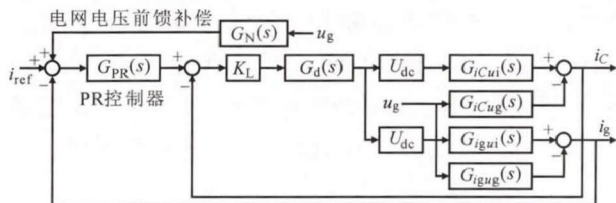


图2 双闭环控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of dual closed-loop control system

其开环和闭环传递函数分别为：

$$G_o(s) = \frac{G_{PR}(s)K_I G_d(s)U_{dc}G_{igui}(s)}{1+K_L G_d(s)U_{dc}G_{iCui}(s)} \quad (1)$$

$$G_c(s) = \frac{G_{PR}(s)K_I G_d(s)U_{dc}G_{igui}(s)}{1+K_L G_d(s)U_{dc}G_{iCui}(s)+G_{PR}(s)K_L G_d(s)U_{dc}G_{igui}(s)} \quad (2)$$

式中： $G_{iCui}(s) = (s^2 L_g C + s R_g C) / (s^3 f_a + s^2 f_b + s f_c + f_d)$ ； $G_{igui}(s) = (s C R_C + 1) / (s^3 f_a + s^2 f_b + s f_c + f_d)$ ； $f_a = L L_g C$ ； $f_b = C [L_g (R_C + R_L) + L (R_C + R_g)]$ ； $f_c = L + L_g + C (R_L R_g + R_C R_L + R_C R_g)$ 。

PR 控制器的传递函数为：

$$G_{PR}(s) = K_p [1 + 2K_\xi \omega_1 s / (s^2 + 2\xi \omega_1 s + \omega_1^2)] \quad (3)$$

在控制信号到驱动信号间，控制器有一定延时，延时环节传递函数 $G_d(s) = e^{-s\tau_d}$ 。

逆变器参数： $U_{dc}=400$ V, $R_L=0.5$ Ω , $u_g=311$ V, $R_g=0.5$ Ω , 采样和开关周期 $T_s=100$ μ s, $C=15$ μ F, 阻尼因数 $\xi=0.01$, $R_C=0$ Ω , $\omega_1=314$ rad/s, $K_L=0.04$, 滤波电感 $L_i=L_g=3.3$ mH, 补偿器比例增益 $K_p=0.5$, PR 补偿器谐振增益 $K_r=60$ 。

3 种典型的延时值 τ_d 中 $\tau_d=T_s/2$ 为最小延时； $\tau_d=T_s$ 为中间延时； $\tau_d=3T_s/2$ 为最大延时。结合并网逆变器参数及在最大延时用一阶 Pade 逼近来逼近 $G_d(s)$, 得到基于 i_c+i_g 控制系统的开环传递函数波特图, 如图 3a 所示。 i_c+i_g 双闭环反馈、 i_L 反馈和 i_L+i_g 双闭环控制策略在相同控制参数下的闭环传递函数波特图, 如图 3b 所示。因此 i_c+i_g 双闭环控制策略是稳定且高效的。

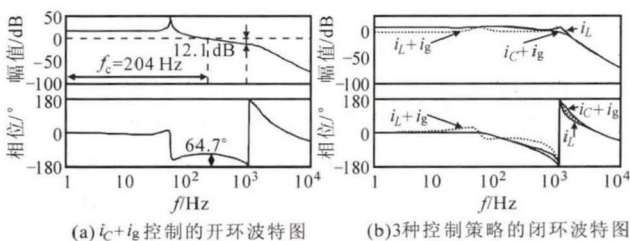


图3 控制系统的波特图

Fig. 3 Bode diagram of control system

2.2 考虑电网电压畸变和谐波负载的控制策略

针对 u_g 畸变时的情况, 通过在控制系统中加入 u_g 前馈补偿 $G_N(s)=1/[G_{PR}(s)U_{dc}]$, 从而可减少并网电压波动对逆变系统输出并网电流的影响。当 u_g 为理想基波电压时, 系统满足并网的要求,

但当电网在恶劣条件下, u_g 的低次谐波可能会很大, 严重时将会影响逆变器注入电网的电流质量, 此时仅依靠 u_g 前馈是远远不够的, 故需对并网电流进行谐波补偿以满足并网要求。带有谐波补偿器的 PR 控制器传递函数为：

$$G_{PR}(s) = K_p \left[1 + \sum_{h=1,3,5,\dots} [2K_\xi \omega_1 s / (s^2 + 2\xi \omega_1 s + \omega_h^2)] \right] \quad (4)$$

2.3 稳定性分析

基于 PR 控制器的双闭环电流控制策略在基频和低频段可使用 s 域模型来更精确地反映控制系统的性能, 但在高振荡频率处的不稳定性却没有办法准确得到, 因此要 z 域模型来更精确地预测。图 4 为控制系统离散模型。

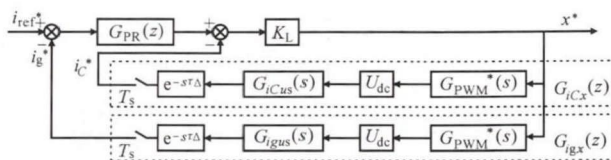


图4 数字控制并网逆变器的电流控制框图

Fig. 4 Block diagram of digital control grid-connected inverter

由双线性变换得 PR 控制器离散域等效式为：

$$G_{PR}(s) = K_p [1 + K_r (a_{z1} z^2 + b_{z1} z + c_{z1}) / (A_{z1} z^2 + B_{z1} z + C_{z1})] \quad (5)$$

式中： $A_{z1}=4/T_s^2+4\xi\omega_1/T_s+\omega_1^2$ ； $B_{z1}=-8/T_s^2+2\omega_1^2$ ； $C_{z1}=4/T_s^2-4\xi\omega_1/T_s+\omega_1^2$ ； $a_{z1}=4\xi\omega_1/T_s$ ； $b_{z1}=0$ ； $c_{z1}=-4\xi\omega_1/T_s$ 。

理想采样下图 4 所示离散域开、闭环传递函数：

$$\begin{cases} G_o(z) = G_{PR}(z)K_L G_{igui}(z) / [1 + K_L G_{iCui}(z)] \\ G_c(z) = G_{PR}(z)K_L G_{igui}(z) / [1 + K_L G_{iCui}(z) + G_{PR}(z)K_L G_{igui}(z)] \end{cases} \quad (6)$$

式中： $G_{iCui}(z) = Z\{G_{PWM}^*(s)U_{dc}G_{iCui}(s)e^{-sT_s}\}$ ； $G_{igui}(z) = Z\{G_{PWM}^*(s) \cdot U_{dc}G_{igui}(s)e^{-sT_s}\}$ ；当 $G_{PWM}^*(s)$ 分别取 $T_s[e^{-s(1-D)T_s/2} + e^{-s(1+D)T_s/2}]/2$, $T_s[e^{-s(1+D)T_s/2} + e^{-s(3-D)T_s/2}]/2$, $T_s[e^{-s(3-D)T_s/2} + e^{-s(3+D)T_s/2}]/2$ 时, 分别对应所提 PWM 最小延时、中间延时和最大延时。

结合逆变器参数并令 $D=0.5$, 图 5 为 s 域下 3 种典型延时根轨迹图。

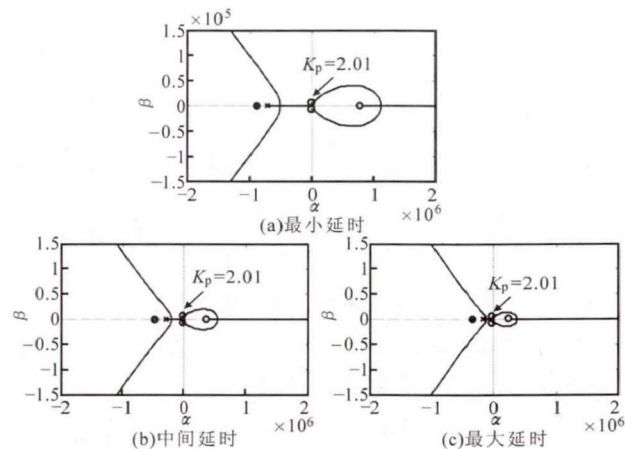


图5 在 s 域下双闭环控制的根轨迹

Fig. 5 Root loci of the in s-plane

图 6 为 z 域下 3 种典型延时根轨迹图。对于数字控制并网逆变器,离散根轨迹能够在 3 种典型延时环节下更精确的得到系统的临界稳定点 ($K_p=1.85; 1.87; 1.91$),从而设计出更加稳定的系统,有利于改善系统的动态性能。

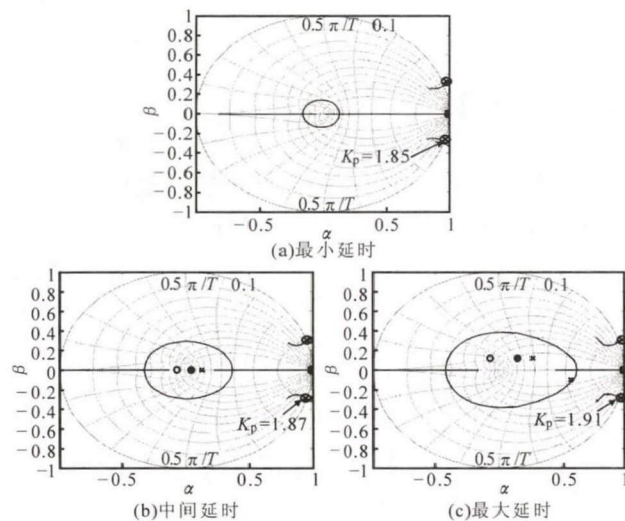


图 6 在 z 域下双闭环控制的根轨迹

Fig. 6 Root loci of the in z -plane

3 实验结果分析

为验证所提方法的可行性,搭建了一台基于 dSPACE1006 的额定功率为 2.2 kW 三相全桥并网逆变器实验平台。实验采用两台 2.2 kW 的逆变器,一台作为并网逆变器,另一台作为可控电压源来模拟电网电压畸变。图 7a 为三相 LCL 型并网逆变器 A 相的电网电压与并网电流半载时的稳态实验波形,此时电流的总谐波失真 THD 为 4.8%,并网发电功率因数 PF 为 0.995,并网电流基波有效值为 1.422 A (给定值为 1.414 A),幅值误差为 0.57%。图 7b 为并网电流由满载突变至半载(突变时刻 $t=0.045$ s)时的实验波形。

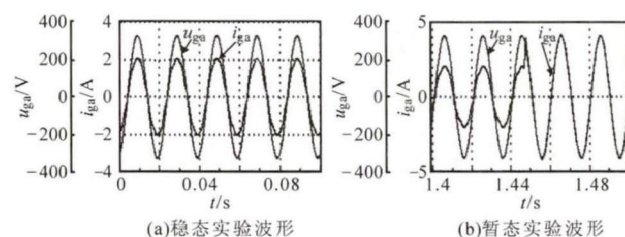


图 7 实验波形 1

Fig. 7 Experimental waveforms 1

图 8 为电网电压严重畸变时,在采用电网电压前馈控制与加入谐波补偿器 PR 前后网侧电流的实验波形。电网电压畸变情况为 5,7 次谐波含量分别为 3%,2%。图 8 分别为没有采用电网电压前馈、采用电网电压前馈以及采用电网电压前馈

并加入谐波补偿器的实验波形,电流 THD 分别为 54.38%,29.12%和 3.92%。这表明加入电网电压前馈与基于 PR 控制器的谐波补偿器能有效选择消除特定次的谐波分量,改善了并网电流质量。

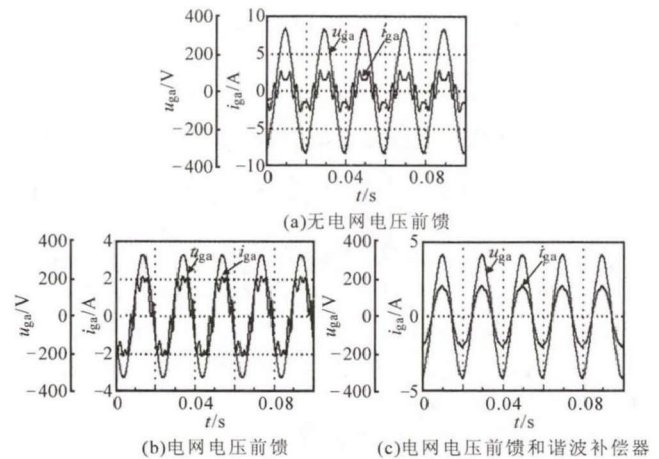


图 8 实验波形 2

Fig. 8 Experimental waveforms 2

4 结论

采用电容电流内环以增加系统阻尼,有效抑制 LCL 谐振;电流外环采用电网电流反馈以及 PR 控制器实现对基频信号的无静差跟踪。为消除电网电压畸变及谐波负载等扰动对逆变器并网电流的影响,采用分别增加电网电压前馈和多谐振 PR 控制器的方法,进一步改善并网电流质量。对比 s 域与 z 域根轨迹可得离散域模型能够更精确的判断出系统临界稳定点。通过对并网电流稳态误差和稳定裕度的分析得到合适的 PR 调节器参数。

参考文献

- [1] REZNIK A, SIMOES M, AL-DURRA A, et al. LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2012, 50(2): 1225-1232.
- [2] TWINING E, HOLMES D G. Grid Current Regulation of a Three-phase Voltage Source Inverter With an LCL input Filter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2003, 18(3): 888-895.
- [3] LOH P C, HOLMES D G. Analysis of Multiloop Control Strategies for LC/CL/LCL-filtered Voltage-source and Current-source Inverters[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(2): 644-654.
- [4] SHEN Guoqiao, ZHU Xuancai, ZHANG Jun, et al. A New Feedback Method for PR Current Control of LCL-filter-based Grid-connected Inverter[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2033-2041.